

空港の“軸と輻の理論”の有効性

The Efficiency of ‘Hub and Spoke Theory’ in Airports

上 野 皓 司
Ueno, Koji

ABSTRACT

The number of airports in the world is increasing rapidly. Airlines manage to decrease airfare under competition. One way to improve the management of airlines is to arrange the network and schedule of flights. Hub and spoke systems in airports are being increasingly arranged by airlines all over the world. Networks of hub and spoke by airlines are not necessarily the best selection because the systems are constructed for maximizing the profit of individual airlines. Directions toward constructing the best hub and spoke network for all airlines and passengers are examined.

自転車の車輪の中心にある軸（hub）とそれから放射状に出ている輻（spoke）の関係を交通や流通、貿易、情報組織等に応用しようとする考えが“軸と輻の理論”すなわち“ハブアンドスポーク理論”（hub and spoke theory）である。この考えは米国で事業運営の方法として考案されたといわれているが、適用分野によって多様な応用方法が提唱されている。例えば流通の軸となる母店と輻となる衛星店との関連と空港の軸となる拠点空港と輻となる衛星空港との関連は、事業体が提供する商品や顧客の種類が異なるために軸となる中心拠点と輻となる衛星との位置関係や立地場所が異なる。ハブアンドスポーク理論は適用対象となる分野ごとに応用方法を考え理論の実用性や有効性を高めてゆかなければならない。以下では適用対象を空港にしばり理論の実用性と有効性を検討する

が、米国では1980年代から航空会社によりこの理論の実践が行われており、多くの研究と評価が示されている。最初にこれらを概観する。

Beesley (1965) はロンドンの都市内交通を参考に道路や地下鉄等への投資がどれほど有意義かを通勤の時間コストと運賃について検討し、通勤の遅れは個人の賃金や企業収益の損失となるが投資による運賃の高騰は個人や企業の負担になり、いずれを選択するかは両者の比較によると述べている。拠点空港の設置も同様な問題を有している。

Levine (1987) は1900年代初期からの米国航空会社の運行規制の歴史を展望し、1978年の国内航空会社規制解除により1980年代は自社の競争力強化と他社の参入防止のためにハブアンドスポークが急速に進展した、と述べている。

Lederer and Nambimadom (1998) は航空機による空路をネットワーク、都市間の便数 (frequency) と予定時刻を時刻表 (schedule) と呼び、航空会社が利潤を極大化し利用客や航空会社がコストを最小にするようなネットワークや時刻表を分析し、航空会社のハブアンドスポークと直行便 (direct service) がどのように比較評価されるべきかをモデルによって検討し、①都市間の距離が短い、②利用客数が多い、③都市の数が少ない、場合はいずれも直行便が最適で、そうでなければハブアンドスポークや他の形態がより有効である、と述べている。

Brueckner (2003) は最近の航空会社間の同盟 (alliances) はハブ空港での航空会社間の乗り継ぎの便宜の増大や飛行便数計画 (frequent-flyer programs) の協調、等により航空会社間の国際航路の継ぎ目のない旅行 (seamless travel) が実現し、国際航路の適切な配分 (codesharing) により国際運賃 (international airfares) は8%-17%、米国運輸省 (DOT=Department of transportation) の独占禁止法免除 (antitrust immunity) のために13%-21%、の減少があり、全体で同盟により旅行者 (interline passengers) は17%-30%の運賃の便益 (benefits) を受けている、と述べている。

ハブ空港は便宜の反面で問題をも生じ、Peterson, Bertsimas and Odoni (1995) は米国では1980年代に空港の渋滞と遅れが著しくなり、1990年には21の空港

で1日55時間、年間2万時間以上の遅れが発生した、と述べ、ハブ空港での待ち行列の長さで待ち時間を空路網を考慮したモデルによって分析している。Vranas, Bertsimas and Odoni (1994) は、1989年のヨーロッパの航空機の渋滞による遅れのコストは利用客のコストを含め50億ドル、米国の渋滞による直接的な遅れのコストは20億ドルと推定され米国航空会社の総利潤がめったに10億ドルを越えることがないことを考えれば渋滞は重要な問題である、と述べ、すべての航空便の出発前の地上と着陸前の空中での待機の合計コストを最小にするように地上での待機の遅れ (ground-holding delays) を最適に割り当てる方法をモデルによって検討し、Richetta (1995) は1990年代半ばに米国では年間4億5千万人の航空機利用客、1日10万回の離発着があり、18のハブ空港でその能力を越え13の他の主要空港で渋滞が発生し、目的空港の渋滞が予測されるときは出発空港で出発時刻を遅らせる対策がとられた、と述べ、地上での待機の最適政策を検討している。Mayer and Sinai (2003) は米国の主要空港での近年の渋滞と離発着の遅れの主な原因は各航空会社の主要空港のハブ空港としての使用であると述べ、出発便は4分-7分、到着便は1.5分-4.5分遅れ、これらの渋滞による遅れは渋滞税 (congestion tax) の課税では大きく改善されないと分析している。

空港数の少ない国では航空会社の数も少ないが規制緩和後空路の再編が行われている。Salvanes, Steen and Sorgard (2005) はノルウェーのSASとBraathensの二つの航空会社の航路と出発時刻を政府の規制がなくなった1994年4月の前後について比較し、二つの航空会社の複占航路では独占航路に比べ出発時刻の特定時刻への集中がみられる、と述べている。

空路の最適な編成は利用客の予測によっているが、Howrey (1969) は都市間航空機利用客数の予測方法の精度を交通全般の重力モデル (gravity models) と交通機関別モデル (mode type models) について比較検討し、入念な交通機関別モデルは単純な重力モデルの予測を越えることができない、と述べている。Barnhart and Schneur (1996) は空路と道路輸送が連携した貨物の至急便の集荷

と配達がどのような経路をたどれば最も最短の時間で実施されるかをモデルによって検討しているが、国際至急便であれば拠点空港から衛星空港を経由するかすぐに道路に入るかが問題になり、衛星空港と道路の競合が発生する。平井磨磋夫（1984）第4章には航空需要予測が、旅客や貨物、運行回数について、①時系列分析、②回帰分析、③地域間流動分析、によってどのように行われるかが概説されているが、予測はかなり不確定であることを前提にしなければならない。

CIA World Factbookによれば2006年11月1日時点の舗装された滑走路を備えた日本の空港は全部で145、3047m超が7、2438-3047mが41、1524-2437mが39、914-1523mが28、914m未満が30で、米国の空港は全部で5119、3047m超が189、2438-3047mが221、1524-2437mが1426、914-1523mが2337、914m未満が946である。1500mの滑走路では双発のプロペラ機や小型のジェット機、2000mでは中型の航空機、2500mでは大型の航空機、3000m以上では乗客や貨物を満載した最重量の航空機が離発着可能である。米国に比べ空港や航空会社の少ない日本であるが、既存空港の拡張や新たな空港の新設が実施されており、ノルウェー等と同様に国内空港間の航路の最適な編成が必要であり、ハブ空港の有効性の検討は一つの課題である。

1. ハブアンドスポーク理論

ハブアンドスポーク理論（HAS理論）は中心となる軸と軸から放射状にでる幅の関係を問題にしているが、空港を対象にすれば軸は中心となる拠点空港、幅は中心空港にアクセスする衛星空港である。ここである領域の中心となる拠点空港の位置を地理上の地点 A 、衛星空港の位置を a_j と表す。地理上の位置は立て軸に緯度を横軸に経度を取り、とりあえず地球の円形や南緯と北緯、東経と西経の問題は考慮せず、0から正の方向へ北に伸びる y 軸である緯度と0から正の方向へ東に伸びる x 軸である経度との範囲内で分析されると考える。このとき A と a_j の空港の位置はすべて xy 座標で正の位置として表現される。この A と

a_j の領域からかなり離れた他の領域に構成される拠点空港を B , 衛星空港を b_j と表す。HAS 理論は a_j から直接 b_j に行くのではなく、 A と B を経由して b_j に至るのが合理的であると説明している。

HAS 理論が有効であるためにはいくつかの条件が必要である。①空港の位置 A, a_j, B, b_j が地理的、自然的に適正に選択されている, ②空港間の距離が妥当である, ③乗り継ぎ空港での待ち時間が少ない, ④運賃が安い, ⑤総所要時間が少ない, 等である。これら以外にも快適, 安全, 等経費と所要時間以外の条件も存在するが, 以下では経費と所要時間に着目して考える。

1-1. 空港の位置

空港の位置は通常は任意に設定することは困難で既存の空港を拠点空港や衛星空港として指定する。新設空港を拠点空港として建設することはよくみられるが衛星空港は既存の空港を利用することが多い。拠点空港は衛星空港から多数の利用客を集めるために衛星空港に比べ大規模な空港でなければならない。領域が拡大し東アジアやアジア全体で拠点空港や衛星空港を設定しようとするれば, 日本, 中国等各国に拠点空港の候補があり, 衛星空港の候補は多数である。各国の空港のなかからどの空港を拠点空港や衛星空港に指定するかについては国家間の政治経済的な利害や合理的な選択の障害となる問題点が多いため以下では主として国内に着目し, 航空会社や空港からみた輸送サービスの供給コストと利用客からみた輸送サービスの購入コストの視点から適正な空港の配置を考える。拠点空港として既存の空港を指定することも考えられるが分析の明確化のために衛星空港は既存の空港で拠点空港は新たに建設されると仮定し, 拠点空港を地理上のどこに設置したらよいかを考える。

A, B を国際空港の拠点とすればこの空港に結ばれる衛星空港は国際線利用客によってだけ利用され, 国際線利用客を対象に需給のコストや所要時間が検討される。このとき A の拠点空港を建設する領域に j 個の空港が存在するとき次の点が検討されなければならない。①個々の空港の国際線利用客数, ② A への

接続便数,である。国際線利用客数が多ければ A に向かう便数を多くし, A を国際線利用客数が多い空港の近くに建設しなければならない。一般に運賃は $a_1 - A - B - b_1$ と $a_2 - A - B - b_2$ では異なり, 一般に国際線利用客数は運賃が低下すれば増加し, 出発空港や目的空港から拠点空港までの運賃はそれぞれの距離に比例する。このとき利用客を多くするためには拠点空港 A, B を合理的な位置に設置する必要がある。

1-2. 拠点空港までの距離と乗り継ぎ時間

衛星空港 a_1 から A までは直行便ではなく a_2 を経由して達することもできる。しかし以下ではこのような間接的経路は除外し衛星空港から拠点空港まではすべて直行便によって結ばれると考える。衛星空港 a_1 と a_2 では A までの距離とそれぞれの衛星空港の出発時刻が異なるために A に到着する時刻が異なる。 A から B に向かう便は一定時刻ごとに出発するために A での待ち時間は衛星空港によって差異がある。利用客の少ない衛星空港から A への便数は僅かであり衛星空港の出発時刻が限られているために A への到着時刻と出発時刻との間にはかなりの開きがあることが多く, A での乗り継ぎ時間は通常長くなる。

利用客は運賃の安さと同時に所要時間の短さをも望むために衛星空港からの距離や乗り継ぎ時間の短縮を期待する。しかし利用客数の少ない空港と利用客数の多い空港が領域の東西の両端に位置していれば東西の中央部に建設される A は利用客数の多い空港側に位置するほうが需給いずれにも全体的には有益である。したがってより利用客数の多い空港近くに A を建設することが求められ, ときには既存の最も利用客の多い空港を A として拡張することも考えられる。大都市に A を設置するのはよくみられる現象である。

衛星空港が多数存在すれば拠点空港までの距離や乗り継ぎ時間を全体として最も小さくする場所をどのようにして選択するかが問題になり, 衛星空港での利用客数を考慮した計算が必要になる。

1-3. 拠点空港の数と相互の運賃や所要時間

上記では地理上に一定の領域が分割され個々の領域のなかで最も望ましい拠点空港の位置が選択されると考えている。しかしこれらの領域が近接していれば領域の区分を変更することが可能であり、区分の仕方によっては拠点空港の数や位置を変化させるほうが合理的である。東アジアの空港から南米の空港までを結ぶ場合は東アジアを一つの領域に南米を他の領域に設定しそれぞれで拠点空港を選択すればよい。しかし北米と南米を結ぶときは領域の区分は多様である。北米には多数の大きな空港があり北米内部で拠点空港をいくつに限定しどこに設定するかは困難な作業である。南米も広大なために同様な問題に直面する。

もし北米と南米に一つの拠点空港を指定すれば、衛星空港の利用客はそれらを経由するが、その距離や所要時間が全体として最も合理的かどうかは北米や南米に複数の拠点空港が設置された場合と比較検討されなければならない。北米に複数の拠点空港が設置されれば利用客は運賃や所要時間の少ない拠点空港を選択する。北米に一つを設置すれば複数設置に比べ全体として距離は長くなるが、拠点空港から出発する便数が多くなり乗り継ぎ時間が短くなり一つの航空機に多くの客を乗せることができるために拠点空港間の運賃を低く設定できる。他方複数設置すれば距離は短くなるが乗り継ぎ時間が長く運賃が高くなる可能性がある。したがって領域の区分や拠点空港の数の選択は、

①衛星空港から拠点空港までの距離、

②拠点空港間の距離と運賃、

③拠点空港での乗り継ぎ時間、

を含めた全体としての運賃や所要時間の考慮によって行われなければならない。

1-4. 運賃, 利用客数, 所要時間

運賃は衛星空港から拠点空港までは距離に比例し拠点空港間は拠点空港での利用客数が多ければ出発便の空席率が低くなるために距離に比べ相対的に低下

する。したがって a_1 から b_1 までの運賃は a_1 から A までの距離、 A での利用客数、 A から B までの距離、 B から b_1 までの距離、によって決まる。全行程の所要時間は a_1 から A までの距離と A での乗り継ぎ時間、 A から B までの距離、 B での乗り継ぎ時間と B から b_1 までの距離、によって決まる。所要時間は全行程の飛行時間と A 、 B での乗り継ぎ時間の単純な合計であるが、運賃は a_1 から A までと B から b_1 までの飛行距離、 A での利用客数により割引かれた A から B までの飛行距離の合計である。したがって衛星空港から拠点空港までの距離が長くなれば比例的に運賃は増大するが、拠点空港間は距離が長くなっても利用客数が多くなれば運賃は低下し距離と利用客数の関数である。一般に利用客数は運賃が高くなれば減少するが全行程の所要時間にはさほど反応しない。

所要時間が経費に関連するのは衛星空港から最初に乗り継ぐ拠点空港での待ち時間である。利用客数が多ければ出発便数が多くなり待ち時間が短くなる。最初に乗り継ぐ拠点空港での待ち時間が短くなれば結果的に拠点空港間の運賃が相対的に低下する。逆に最初に乗り継ぐ拠点空港での待ち時間が長ければ利用客数は少なく、拠点空港間の運賃は相対的に高くなる。この乗り継ぎ時間の長短は拠点空港の内部で全般的に決められる。拠点空港へ向かう乗客の少ない衛星空港では拠点空港への便数が少なく結果として拠点空港での乗り継ぎ時間は長くなるが、このような所要時間は利用客の出発衛星空港の状況によるもので利用客自身が甘受しなければならない。

2. 拠点空港の位置の選択

拠点空港を決めるためには領域を区分し拠点空港の数を選択しなければならない。現実には各国の利害や航空会社の経営が錯綜するために複数の国を包括した領域を設定することは困難であり、多くの衛星空港を有する国内で領域を区分し拠点空港の数と位置を設定することが考えられる。例えば日本や米国でのこれらの検討は有意義である。

2-1. 利用客数

衛星空港には出発客と到着客が出入するが各国ごとに拠点空港が設定される
と考え、国の表示を i , i の国の衛星空港の表示を j と表せば、第一国の第一番目の
衛星空港の表示は a_{11} であり、衛星空港の出発客数を α , 到着客数を β と表せ
ば、衛星空港 ij の出発客数は α_{ij} , 到着客数は β_{ij} である。 i 国の拠点空港は単数
か複数であるが拠点空港を明示するために第一国の拠点空港を A , 第二国の拠
点空港を B , 第三国の拠点空港を C , 以下アルファベットの大文字で表す。第一
国の拠点空港が一つだけ存在するときは A , 1 と 2 の複数存在するときは 1 の空
港は A_1 , 2 の空港は A_2 , 第二国の拠点空港が一つだけ存在するときは B , 1 と 2
の複数存在するときは 1 の空港は B_1 , 2 の空港は B_2 と表す。

このとき単一拠点空港 A を経由する出発客数は衛星空港の出発客数の合計で、
 A の出発客数を $A\alpha$ と表せば、衛星空港が n 個存在するときは

$$A\alpha = \sum_j \alpha_{1j}, j = 1, 2, \dots, n,$$

1 と 2 の複数存在するときは、理論的には最も合理的な拠点空港への接続によつ
て衛星空港の出発客が分割され、 A_1 にはたとえば $j = 1$ から k まで、 A_2 には
 $j = (k+1)$ から n までがアクセスする。このさいには A_1 を経由する出発客数
は

$$A_1\alpha = \sum_j \alpha_{1j}, j = 1, 2, \dots, k,$$

$$A_2\alpha = \sum_j \alpha_{1j}, j = (k+1), (k+2), \dots, n,$$

である。

到着客数は β_{ij} のすべてが拠点空港を経由するが、第一国に A 空港ひとつだけ
であればすべてが A を経由するために A を経由する到着客数は

$$A\beta = \sum_j \beta_{1j}, j = 1, 2, \dots, n,$$

1 と 2 の複数存在するときは、理論的には最も合理的な拠点空港への接続によつ
て衛星空港の到着客が分割され、 A_1 をたとえば $j = 1$ から k まで、 A_2 を $J =$
 $(k+1)$ から n までの到着客利用するために、 A_1 を経由する到着客数は

$$A_1\beta = \sum_j \beta_{1j}, j = 1, 2, \dots, k,$$

$$A_2\beta = \sum_j \beta_{1j}, \quad j = (k+1), (k+2), \dots, n,$$

である。

日本と米国を旅行するとき両国内に複数の拠点空港が存在しても日米間の距離が長いために両国内の拠点空港間の距離は相対的に僅かである。したがって両国内での拠点空港の選択は衛星空港と拠点空港の合理性によって選択されと考えられ、同じ衛星空港の出発客と到着客はいずれも両国内では同じ拠点空港を利用すると考える。

2-2. 距離

衛星空港がすべて同じ利用客数であればすべての衛星空港からの距離の合計が最短になるように拠点空港を設置すれば利用客の運賃が最小になり、利用客も増大する可能性がある。しかし個々の衛星空港の利用客数が異なれば実際の距離を最短にしても全体の利用客の運賃を最小にすることにはならない。そこでそれぞれの衛星空港の利用客数と拠点空港までの距離の双方を考慮した“利用客総距離”を採用する。利用客総距離 D は利用客数と拠点空港までの距離を乗じた総和であり、衛星空港と拠点空港間を移動する出発客と到着客の総移動距離である。

第一国の衛星空港名を a_j 、第二国の衛星空港名を b_j 、第三国の衛星空港名を c_j 、 a_j から A_i までの距離を dA_ia_j 、 b_j から B_i までの距離を dB_ib_j 、 c_j から C_i までの距離を dC_ic_j と表す。このとき三つの国内の衛星空港の出発客の利用客総距離 $DA_i\alpha_{1j}$ 、 $DB_i\alpha_{2j}$ 、 $DC_i\alpha_{3j}$ は、もし各国に拠点空港が一つであれば、

$$DA\alpha_{1j} = \sum (dAa_j \times \alpha_{1j}),$$

$$DB\alpha_{2j} = \sum (dBb_j \times \alpha_{2j}),$$

$$DC\alpha_{3j} = \sum (dCc_j \times \alpha_{3j})$$

であり、到着客の利用客総距離 $DA_i\beta_{1j}$ 、 $DB_i\beta_{2j}$ 、 $DC_i\beta_{3j}$ は、各領域に拠点空港が一つであれば、

$$DA\beta_{1j} = \sum (dAa_j \times \beta_{1j}),$$

$$DB\beta_{2j} = \Sigma(dBb_j \times \beta_{2j}),$$

$$DC\beta_{3j} = \Sigma(dCc_j \times \beta_{3j})$$

である。したがって利用客総距離 $DA = DA\alpha_{1j} + DA\beta_{1j}$ は

$$DA = \Sigma(dAa_j \times \alpha_{1j}) + \Sigma(dAa_j \times \beta_{1j})$$

であり、 B や C の利用客総距離は

$$DB = \Sigma(dBb_j \times \alpha_{2j}) + \Sigma(dBb_j \times \beta_{2j})$$

$$DC = \Sigma(dCc_j \times \alpha_{3j}) + \Sigma(dCc_j \times \beta_{3j})$$

である。拠点空港が一つの国に複数存在するときはそれぞれ区分された領域ごとに利用客総距離が計算される。

衛星空港の位置や衛星空港での出発客数や到着客数が確定している 0 時点では最も合理的な拠点空港は利用客総距離が最小になる位置に設置される。しかし時間が経過し衛星空港周辺の社会経済情勢の変化によって利用客数が増減すれば既存拠点空港の利用客総距離は必ずしも最小ではなくなり拠点空港の位置を再検討する必要性が生じる。

2-3. 利用客総距離による拠点空港の位置の選択方法

0 時点の拠点空港の設定は既存の衛星空港の位置と利用客数から判断され、未知数である拠点空港までの距離が決められる。上記の第一国に一つが選択されるとすれば、

$$\begin{aligned} DA &= \Sigma(dAa_j \times \alpha_{1j}) + \Sigma(dAa_j \times \beta_{1j}) \\ &= \Sigma\{dAa_j(\alpha_{1j} + \beta_{1j})\} \end{aligned} \quad (1)$$

であり、(1) の j 個の dAa_j が未知数で α_{1j} と β_{1j} は既知の定数である。

横軸に x 、立て軸に y をとり x と y がいずれも正であれば、衛星空港 a_j の位置は座標上で (x_j, y_j) 、拠点空港の位置は未知数 (x, y) と表され、衛星空港から拠点空港までの距離は $\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}$ と計算される。もし拠点空港が任意の位置に設定可能であれば、

$$DA = \Sigma \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \times (\alpha_{1j} + \beta_{1j}) \quad (2)$$

を最小にする x と y が座標上で検討されるが、既存の空港の位置に限定があれば、(2) の最も合理的な位置はその限定した位置内部で選択される。この拠点空港の位置は衛星空港が少数であれば代数的に決定することも可能であるが多数存在すれば数式の解法によって直ちに求めることはできず座標上で多数の位置をランダムに選び発見的方法 (heuristic calculation) により相互の比較から順次より小さい利用客総距離の位置を求めてゆかなければならない。

利用客総距離による拠点空港の位置の決定は利用客数の多い衛星空港の近くに拠点空港を設置することになり利用客数の多い衛星空港を利用する利用客は目的空港までの距離と運賃及び所要時間の値が小さくなるが利用客数の少ない衛星空港を利用する客はすべての値が相対的に大きくなる。

(2) により利用客総距離がより小さな拠点空港が選択されるがこのとき次のような事態が発生する。①領域内の東西南北の端に利用客数の多い衛星空港が分散的に存在し、領域の中央部に拠点空港を配置すれば、拠点空港に近く利用客が少ない衛星空港からの発着便は少なく、拠点空港から遠い衛星空港のほうが便利である、②東西南北の衛星空港は過去は他の国まで直行便で結ばれていたが、拠点空港の設置によって拠点空港を経由する長距離の移動と拠点空港での乗り継ぎを経験しなければならない、③領域内に特に利用客の多い衛星空港が一つありその近くに拠点空港が設置されれば他の多数の衛星空港は長距離の移動と拠点空港での乗り継ぎを経験しなければならない。①や②の問題は米国のような広い国土内で生じる。

利用客総距離を最小にする拠点空港の設置が実際に有意義かどうかは運賃、移動距離、所要時間の三点から検討されなければならない。

3. 拠点空港設置の問題点

問題点を明確にするために米国のような広い国内での拠点空港の設置を考える。米国内には利用客の多い空港がいくつか存在するが、このような国では拠点空港をどこにいくつ設置するかを選択は極めて困難である。日本のような狭

い国土でも一つの拠点空港の設置は他の主要空港の利用客が拠点空港を経由しなければならないために飛行距離以外に乗り継ぎ時間や乗り継ぎのさいの煩わしさを経験する。以下では問題点を明示するために国内が正方形の地形でその四隅に主要空港が存在する場合を考え、拠点空港設置の有効性を検討する。

3-1. 利用客総距離による拠点空港の位置の選択

最初に最も簡単な例として四隅の主要空港からの出発客と到着客がすべて同数と仮定する。主要空港の名称を北西を a_1 、南西を a_2 、北東を a_3 、南東を a_4 とする。このとき主要空港だけを検討対象にし拠点空港を一つ選択すれば、拠点空港は国土の中心部になる。正方形の南北や東西の長さを 1 とし、各衛星空港の利用客数を同じ数 γ とすれば、拠点空港から衛星空港までの距離は

$$\sqrt{(0.5)^2 + (0.5)^2} = 0.5\sqrt{2} \approx 0.7071$$

であり、利用客総距離は

$$0.5\sqrt{2} \times 4\gamma \approx 0.7071 \times 4\gamma = 2.8284\gamma$$

となる。

拠点空港を二つ設置可能であれば、東西か南北のいずれかの二つの平行な直線の中央に一つずつ設置すればよく、拠点空港から衛星空港までの距離は 0.5 であり、利用客総距離は $0.5 \times 4 \times \gamma = 2\gamma$ である。

拠点空港を二つ設置可能であれば一つに比べ利用客総距離が 2.8284γ から 2γ に減少し、利用客の移動距離は短縮するが、拠点空港建設経費が大きな問題となるために以下では拠点空港は一つ設置可能という条件のもとで考える。

拠点空港を一つ設置するとき主要空港の利用客数が異なればどうであろうか。この国を第一国とすれば $a_j (j = 1, 2, 3, 4)$ の利用客数は $(\alpha_{1j} + \beta_{1j})$ であり、拠点空港の位置を (x, y) とすれば、 a_1 の位置は $(0, 1)$ 、 a_2 の位置は $(0, 0)$ 、 a_3 の位置は $(1, 1)$ 、 a_4 の位置は $(1, 0)$ である。このとき中央部に設置する拠点空港を経由する利用客総距離 DA は、

$$\begin{aligned}
 DA &= \sum \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \times (\alpha_{1j} + \beta_{1j}) \\
 &= \sqrt{x^2 + (y-1)^2} \times (\alpha_{11} + \beta_{11}) + \sqrt{x^2 + y^2} \times (\alpha_{12} + \beta_{12}) \\
 &\quad + \sqrt{(x-1)^2 + (y-1)^2} \times (\alpha_{13} + \beta_{13}) \\
 &\quad + \sqrt{(x-1)^2 + y^2} \times (\alpha_{14} + \beta_{14})
 \end{aligned}$$

であり、この DA を最小にする位置 (x, y) が求められる。(3)

正方形の四隅に主要空港が位置するときはより利用客数が多い空港側に拠点空港を設置すれば利用客総距離が小さくなるが、具体例を示せば、①対角線に位置する空港の利用客数がいずれもほぼ等しければ正方形の中心部が選択される、②一組の対角線に位置する空港の利用客数がほぼ等しく他の一組の対角線に位置する空港の利用客数が少ないときは前者の対角線の中央部に近い位置が選択される、③一組の対角線に位置する空港の利用客数がほぼ等しく他の一組の対角線に位置する空港の利用客数に大きな差異があるときは前者の対角線の中央部から他の対角線の利用客数の多い空港側に移動した位置が選択される、④東西や南北の一边で隣接する空港の利用客数がほぼ等しく他の一边の利用客数が比較的少ないときは前者の一边の中央部に近い位置が選択される、⑤一つの空港の利用客数が特に多いときはその空港の近くが選択される、等である。

上記では主要空港だけに着目しているが他の小さな衛星空港が存在すればそれらによって位置がさらに修正される可能性がある。利用客数が主要空港に比べ大幅に少なければ拠点空港の位置の選択にはさほど影響を及ぼさない。

3-2. 利用客総距離による拠点空港選択の問題点

利用客総距離による拠点空港の設置は衛星空港から他の国への直行便を排除し拠点空港での航空機の乗車率や便数を増大し路線の経営を改善する。他方で利用客数の少ない衛星空港はこれまでより不便になり利用客数が減少し、目的地までの所要時間が増大する。空路は鉄道や道路等と競合しており、拠点空港へアクセスする鉄道やバス路線の拡充により既存の衛星空港は大きな負の効果を経験することがある。

複数の航空会社が国内で運行しているときハブ空港の設置は航空会社によって独自に実施されることがある。自社の路線網を適宜衛星空港と拠点空港に分類し衛星空港から拠点空港を経由して他国に接続する方法である。このさいには衛星空港の利用客は拠点空港を経由しなければならないが航空会社の経営効率が高まるために所要時間は長くなるが運賃は低下する。航空会社のハブ空港の設置は航空会社独自のハブアンドスポークが形成されるために国内に複数のネットワークが形成され利用客は都合の良い航空会社を選択する。しかし航空会社の任意的なネットワークの設置は利用客数に応じた一時的な設置であることが多く一般の利用客には周知されていず、ここで対象としている国全体のハブアンドスポークとは異なる。

利用客総距離以外に適切な選択方法が存在するであろうか。利用客総距離は総利用客の飛行距離を最小にする経路の選択であり航空会社ごとの経営効率や個々の航空機の定員や乗車率等については何も問題にしていない。現実には拠点空港から大きな航空機で飛行するより衛星空港から小さな航空機で直行するほうが所要時間が短く運賃が安くなることがある。したがって個々の空港の目的地までの利用客数をまず正確に把握することが重要になる。空路による OD 表 (origin and destination flows) の把握である。利用客総距離がマクロの全体分析であれば OD 表による衛星空港ごとの分析はミクロの個別分析である。全体分析は個別分析と比較検討されてより良い結果に到達できる。利用客総距離による分析は衛星空港ごとの OD 表による分析と比較され相互の問題点が明確になって初めてハブ空港の利用方法や設置の位置が明らかになる。

3-3. 利用客総距離と OD 表による分析の比較検討

第一国の衛星空港 a_1 の出発客数は α_{11} であるが、この α_{11} は午前から午後にかけての 1 日の総出発客数と考える。衛星空港 a_1 から第一国の一つの拠点空港 A を経路するときこの拠点空港では多数の国に国際便が出発しており衛星空港 a_1 の出発客は A で多数の異なった国への便に分かれる。 a_1 の出発便の時刻を無視

し、小型航空機の乗車定員を λ とすれば、この航空機が A に向かう最小の便数 x は α_{11} が λ で割り切れれば、 $(\alpha_{11} \div \lambda) = x$ 、 α_{11} が λ で割り切れなければ小数点以下を切り上げ $(\alpha_{11} \div \lambda) < x$ となる。一般には指定された時刻に A に向かう便が出発するために α_{11} を λ で割り小数点以下の端数を切り上げるといった便数ではなく、より多くの便数が出発するが、ここでは分析のために最小の便数を想定する。

a_1 からの出発客がどのような国に向かうかはOD表を作成すればわかり、もし一つの国の拠点空港 B への客が λ 前後かそれを越えれば定員 λ の小型航空機かより定員の多い航空機で B へ直行することが可能である。直行便のほうが所要時間や飛行距離が少ない。問題は B への客が λ よりかなり少ない場合である。乗車率が低下すれば運行経費が上昇するために適正な乗車率の維持が直行便運行の条件になる。

各国への出発客が λ より大幅に少ないときは拠点空港 A の経路が最小経費となるが、 B への客が λ より多い場合でも A の経路が経費の減少になるかどうかである。1日1便 a_1 から B へ小型の直行便を運行するより A を経由して大型機を利用するほうが経費が低くなるときは所要時間は長くなるが運賃の低さを選択して A の経路が考えられる。

拠点空港の長所は多数の衛星空港から客を集め各国の拠点空港へ適切な大きさの航空機を運行することができることである。たとえば D へは第一国の個々の衛星空港からの客は僅かであるが A を経由することにより λ の定員の小型機を運行可能であれば、拠点空港の設置によって第一国から D へ初めて直行便が実現する。 A を経由する客数が λ より大幅に少なければ他の国の拠点空港を経由して D へ行かねばならない。

国際便は税関や検疫等入国手続きに事務的な人員や設備等を必要とし運賃以外の空港維持費のために拠点空港に国際便を集中しなければならない、という問題があるが、このような点を無視し経済的な側面にだけ注目しても他に拠点空港設置の必要性が存在する。それは個々の衛星空港では季節等により客数

が大きく変化し、直行便の客を十分に確保できないことがあり、個々の衛星空港の目的地への客数の変化を拠点空港で調整する必要があるという点である。

3-4. 利用客の時期的な変化

衛星空港の出発客は時期によって変化しその数を $\alpha_{1j}(t)$ と表せば A を経由する出発客数は

$$A\alpha(t) = \sum_j \alpha_{1j}(t), j = 1, 2, \dots, n$$

である。これらの客は各国の拠点空港へ分散して出発し目的国を h と表せば、 A を出発する h へのお客は

$$A\alpha_h(t) = \sum_j \alpha_{1jh}(t), j = 1, 2, \dots, n, h = 1, 2, \dots, m$$

である。 $\alpha_{1jh}(t)$ は時期によっては λ やそれ以上の定員の航空機で直行便を運行することができるが客の少ない時期は A を経由する。 A においても時期により目的国への客が変動するために出発便数や出発時刻を適宜変更しなければならない。

それではある時期 $t = 1$ に $h = 2$ への客が $h = 2$ へ直行便を運行するほど客が集まらなかった場合はどうであろうか。このさいは他の国を経由しなければならないが最小運賃の経由国が $h = 3$ であれば、この時期には $h = 3$ への客数が追加される。 $h = 2$ 以外に $h = 4, h = 5, h = 6$ 等への客も少なくすべて $h = 3$ を経由すれば $h = 3$ への客はかなり増大する。直行便の運行は衛星空港と拠点空港の両方で段階的に考慮され最終的には他の国を経由しなければならないこともある。空路のネットワークは時期によって変化しながら複雑に構成されている。変化の著しい利用客であるが、拠点空港ではどのように運行計画を策定すればよいであろうか。

第一国の拠点空港から主要な目的国である $h = 3$ への出発客数の把握を考える。運行計画の時期を $0, 1, 2, \dots$ と区分し、 0 期を現在とすれば、 1 期以後の出発客数は衛星空港の客数の変化によって決められる。すなわち 1 期のお客数 $A\alpha_3(1)$ は

$$\begin{aligned} A\alpha_3(1) &= A\alpha_3(0) + \Delta A\alpha_3(1) \\ &= A\alpha_3(0) + \Delta \sum \alpha_{1j3}(1), \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

である。次の1期に衛星空港の $h=3$ への出発客数はどのように変化するであろうか。個々の衛星空港の $h=3$ を目指す出発客数以外に他の国を目指す $h=3$ を経由しなければならない客数も含まれる。個々の衛星空港の変化はOD表の推定による。OD表をどのように予測するかは個々の衛星空港の状況によって異なるが、一般的には過去の長期趨勢や年間の季節変動の周期を分析することによって予測値が得られる。

利用客は出発客だけではなく到着客があり便数や空路の設定は両者を予測することによって行われる。もし $h=3$ への出発客数がさほど多くなくても $h=3$ から A への到着客が多ければ復路の客を計算して A からの出発便数を多くすることも考えられる。出発客数と到着客数の時期的な変化を把握し合理的な便数を設定しなければならない。

4. ハブアンドスポーク理論の多様性

衛星空港から他国への直行便を認め直行便運行が困難な客だけが拠点空港を利用するシステムは利用客にとっては最も経済的で所要時間が少ない。しかし利用客の時期的な変動や国際便に関連する施設等の問題から現実には衛星空港は国内便に限定し国際便を拠点空港に集中する必要がある。このとき国内の拠点空港の数と設置場所が問題になる。上記のように利用客総距離による判断は必ずしもすべての利用客に最小運賃や最小所要時間を保証しないがこれ以上の判断の方法は見出せない。運行航空会社が複数であれば競合によって供給側のムダが生じることがあるが、相互に出発時刻等を調整すれば比較的合理的な航路の設定が可能である。しかし常に残る課題は利用客が空港によって絶えず変動し趨勢値や季節的な変化の形態が変遷してゆくという点であり、拠点空港と衛星空港を結ぶ便数や拠点空港の稼働状態が絶えず検証されなければならない。

複数国間で一つのハブ空港を目指す議論がよくみられるが入出国には税関や

検疫等の各国独自の手続きが必要であり飛行距離による運賃、乗り継ぎによる所要時間等を考慮すれば複数国に一つの拠点空港の設置は極めて困難である。飛行距離や到着時刻、各国の拠点空港での乗り降り等のために特定の拠点空港が多く利用される可能性はあるが、これは各国の拠点空港を衛星空港とみなしたより次元の高い“国際ハブ空港”の問題であり、上記のような距離、運賃、所要時間等の分析だけでは尽くせない問題点を有している。国際ハブ空港の設置は各国の航空会社の基地空港の位置や運賃、空路、集客等流動的な要因によって判断されるために、一面的な合理性によって検討されることは極めて困難であり、今後の課題である。

参考文献

- Barnhart, Cynthia and Rina R. Schneur, “Air Network Design for Express Shipment Service”, *Operations Research*, 44 (1996), 852–63.
- Beesley, M. E., “The Value of Time Spent in Travelling: Some New Evidence”, *Economica*, New Series, 32 (1965), 174–85.
- Brueckner, Jan K., “International Airfares in the Age of Alliances: The Effects of Codesharing and Antitrust Immunity”, *Review of Economics and Statistics*, 85 (2003), 105–18.
- 平井磨磋夫 編著, 土木学会編, 『新体系土木工学 69 空港』技報堂出版, 1984 年。
- Howrey, E. Philip, “On the Choice of Forecasting Models for Air Travel”, *Journal of Regional Science*, 9 (1969), 215–24.
- Lederer, Phillip J., and Ramakrishnan S. Nambimadom, “Airline Network Design”, *Operations Research*, 46 (1998), 785–804.
- Levine, Michael E., “Airline Competition in Deregulated Markets: Theory, Firm Strategy, and Public Policy”, *Yale Journal of Regulation*, 4 (1987), 393–494.
- Mayer, Christopher, and Todd Sinai, “Network Effects, Congestion Externalities, and Air Traffic Delays: Or Why Not All Delays Are Evil”, *American Economic Review*, 93 (2003), 1194–215.
- Peterson, Michael D., Dimitris J. Bertsimas, and Amedeo R. Odoni, “Decomposition Algorithms for Analyzing Transient Phenomena in Multiclass Queueing Networks in Air Transportation”, *Operations Research*, 43 (1995), 995–1011.
- Richetta, Octavio, “Optimal Algorithms and Remarkably Efficient Heuristic for the Ground-Holding Problem in Air Traffic Control”, *Operations Research*, 43 (1995), 758–70.

- Salvanes, Kjell G., Frode Steen, and Lars Sorgard, “Hotelling in the Air? Flight Departures in Norway”, *Regional Science and Urban Economics*, 35 (2005), 193–213.
- Vranas, Peter B., Dimitris J. Bertsimas, and Amedeo R. Odoni, “The Multi-Airport Ground-Holding Problem in Air Traffic Control”, *Operations Research*, 42 (1994), 249–61.